0254-6124/2011/31(5)-670–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Hu Shengbo, Meng Xin, Yao Xiujuan. Broadband signal processing for deep space array network based on frequency-domain beamformer. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 670-674

频域波束合成的深空宽带阵列信号处理 *

胡圣波[1,2] 孟 新[2] 姚秀娟[2]

1(贵州师范大学智能信息处理研究所 贵阳 550001)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 深空通信已进入了高速率传输的时代. 借助于射电天文中的小口径天线组阵思想, 深空阵列网络因其优越的性价比, 已成为深空网络高速数据传输的最终解决途径. 基于 FX 型相关器, 提出了一种集阵列信号合成、相关处理为一体的频域波束合成器架构和方法. 该架构和方法具有很强的鲁棒性和灵活性, 并可支持多任务探测. 同时, 介绍了分析–综合滤波、阵列信号相干合成和自适应可变分数时延等信号处理关键技术.

关键词 深空通信, 高速, 波束合成, 频域

中图法分类号 V 443

Broadband Signal Processing for Deep Space Array Network Based on Frequency-domain Beamformer

HU Shengbo[1,2] MENG Xin[2] YAO Xiujuan[2]

1(*Institute of Intelligent Information Processing, Guizhou Normal University, Guiyang* 550001)

2(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Deep space communications have entered a new era of high speed transmission. Based on the deployment of large arrays of small antennae within radio astronomy community, Deep Space Array Network (DSAN) has become the final means for high speed transmission of deep space network. Based on the FX correlator, the architecture of frequency domain beamformer which has integrated array signal forming with correlate processing is presented. The method presented in this paper is to break up the signal into different frequency channels and analyze each frequency channel separately to obtain phase and delay feedback information. The method would be a significant step forward in both performance and complexity, which has great flexibility and robustness, and can support multi-missions. Finally, the key techniques of analysis-synthesis filtering, sub-array signals coherent forming, and adaptive variable fraction delay are described.

Key words Deep space communication, High speed, Beamforming, Frequency-domain

---

* 国家高技术研究发展计划资助 (2006AA701205B)

2010-03-08 收到原稿, 2011-03-31 收到修定稿

E-mail: hsb@cssar.ac.cn

1 引言

当前, 深空探测在时间、空间、频谱分辨率上呈现不断提高的趋势 [1]. 这种趋势必将造成探测数据量不断增加 [2], 同时, 数据传输率也要不断提高. 为适应数据传输率不断提高的挑战, 除可采取提高探测器 EIRP 值的策略外 [3], 只有提高地面接收能力.

提高地面接收能力实际上就是提高地面深空网络 (Deep Space Network, DSN) 的 A/T 值, 其中, A 为地面天线系统的有效接收面积, T 为系统温度. 提高 A 值可以采用增加天线口径的办法, 但增加天线口径需要克服重力变形以及外界环境的影响, 这些都需要有复杂的控制机构 [4]. 此外, 大口径天线研制及运行成本也很高 [5]. 因此, 近年来为提高有效接收面积, 改善接收性能, 降低制造成本, 基于射电天文中的 SKA (Square Kilometer Array)[6] 技术, NASA 正在研究由同一地方 40 个或者 400 个口径为 12 m 的天线组成的深空阵列网络 (DSAN, Deep Space Array Network)[7] 技术, 并把此项技术和 Ka 波段的 180 W 行波管功率放大技术共称为下一代深空通信技术 [8].

NASA 提出的深空阵列网络技术采用时域波束合成与 SUMPLE[9] 阵列信号相干的组合架构. 在这种架构中, 阵列中的天线接收数据和合成数据需要返回到参与相关计算的每一个节点, 这就要求提供数据返回路径或者每一个求和单元之间需要相互连接. 对于由数百个天线组成的阵列来说, 就需要有数百条数据返回路径和数百次连接, 势必造成系统的复杂性和运行的不可靠. 为降低系统实现的复杂性, 提高系统运行的可靠性, 基于 FX 类相关器 [10], 本文提出一种集阵列信号合成、相关处理为一体的频域波束合成器架构, 并对信号处理关键技术进行分析.

2 FX 型相关器

目前, 谱相关器已成为通信、图像处理和射电天文领域中获取信号相位信息的重要手段 [11]. 谱相关器的主要功能是测量两个信号的互功率谱, 并可分为 XF 型相关器和 FX 型相关器两类, 如图 1 所示. XF 型相关器中, 天线接收到的信号经 A/D 处理后, 由时延线和乘法器作互相关运算, 再作 FFT 变换. FX 型相关器则先对信号作 FFT 变换, 再进行乘法和类加运算.

XF 相关器中, 每对基线乘法次数等于信号划分的频道数 N, 而 FX 相关器则只有一次复数乘法和一次累加运算. 如果考虑 FX 相关器中 FFT 运算的乘法运算次数, 每一对基线的乘法次数则为 $1+20k/(M-1)$, 这里, k 为 FFT 运算所需乘法次数的因子, M 为天线信号数. 射电天文中, 通常都满足 $N>1+20k/(M-1)$. 因此, 与 XF 相关器相比, FX 型相关器可大大降低建设和运行成本, 提高运行的可靠性. 例如, 在澳大利亚新南威尔士的数百个天线组成的 SKA (Square Kilometer Array) 工程 [12] 中, 由于天线阵列频道数为 10 000, 即采用了 FX 型相关器.

3 频域波束合成器架构

深空阵列网络波束合成器面临组合数百个天线信号, 满足 500 MHz 信号传输带宽需求 [12] 的技术问题, 而如何用简单的方法得到实时相位、时延修正数

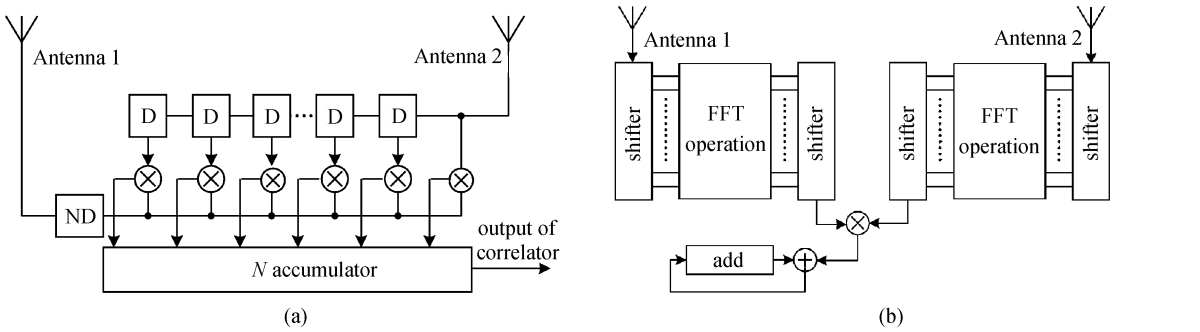

图 1 XF 相关器 (a) 和 FX 相关器 (b) 架构

Fig. 1 Architecture of an XF correlator (a) and FX correlator (b)

据是必须解决的问题. SUMPLE 算法需要完成其中一个天线信号和阵列中其他天线信号和的相关运算, 这些运算都是计算密集型的. 时域波束合成器中采用 SUMPLE 方法修正数据, 将导致处理模块之间的相互连接, 并且连接数随天线数线性增长. 采用基于 FX 相关器的频域波束合成器架构则有可能较好地解决这个问题, 图 2 是基于 FX 相关器的频域波束合成器架构示意.

图 2 中, 分析滤波器组完成中频信号的频率分割, 即把带宽为 500 MHz 的中频信号分割成不同的频率通道, 中频信号的频率分割采用多相滤波器组 + FFT 的模式. 这种模式的优点是, 可以较小的过采样获取每个频率通道平坦的幅频响应, 而 FFT 滤波器组则要更高因子的过采样才能获得同样的幅频特性. 同时, 为保证信号的相干性, 分析滤波器还将完成信号时延和相位调整. 这之后, 信号被传送到 5 个频带选择分路器; 每个频带选择分路器可以选择 100 MHz 带宽、8 位的同相数据 I 和正交数据 Q 或者 200 MHz 带宽、4 位的同相数据 I 和正交数据 Q, 可支持高达 400 MHz 带宽、2 位的 I 和 Q 数据. 5 个频带选择分路器具有很强的冗余性和灵活性.

数据路由器将每一个天线不同频带的数据流转换成同一个频带不同天线的数据流. 这种数据流的转换具有如下优点. 一是省去单独的树型加法器即可完成所有天线的数据和, 得到相控阵信号. 因为在同一个频率通道内包括了不同天线的数据, 因此可以在同一个相关器中完成数据的相加. 二是在同一个频率通道内包括了所有天线的数据, 因此可以选择包

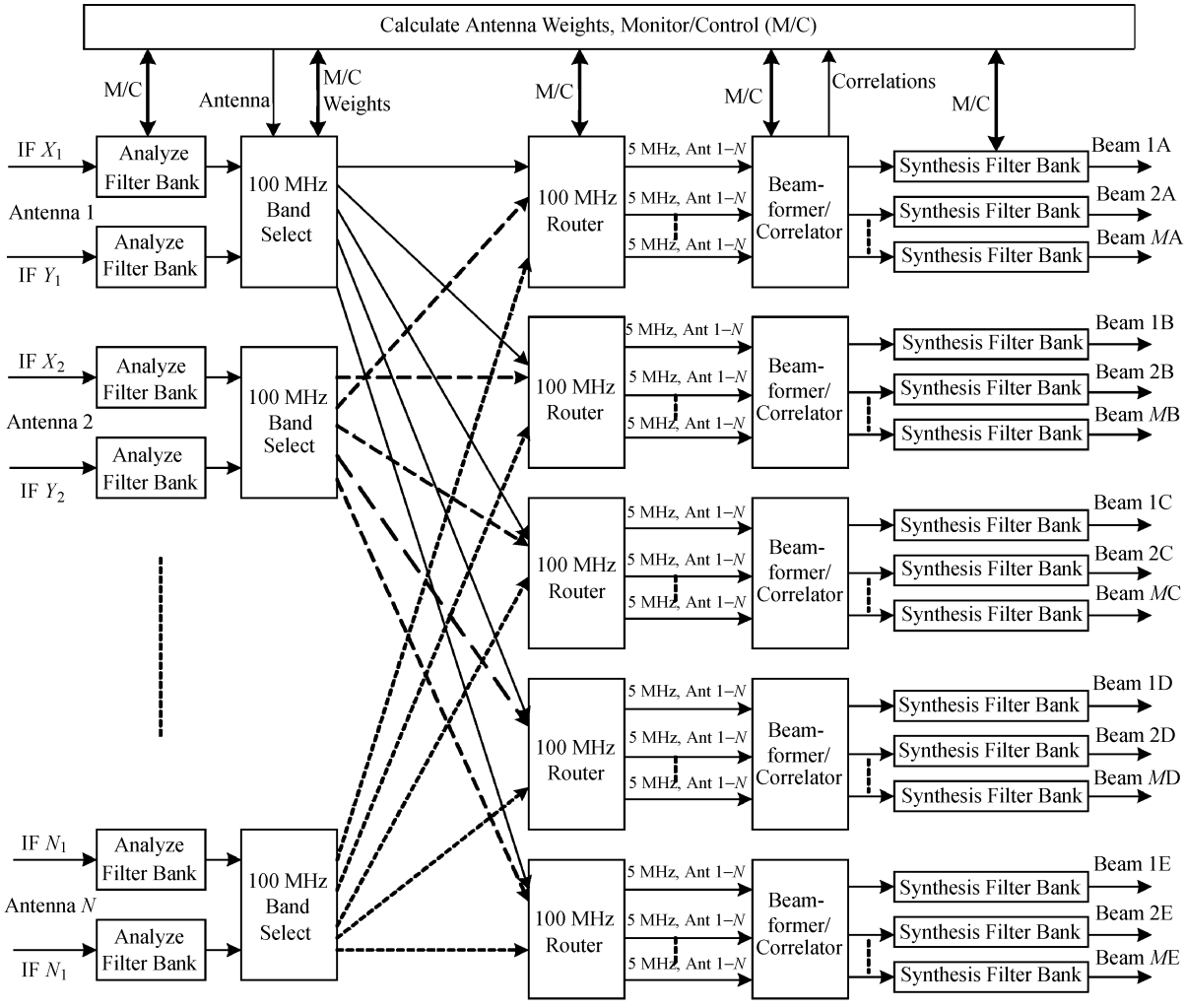

图 2 基于 FX 相关器的频域波束合成器架构

Fig. 2 Architecture of the frequency-domain beamformer based on FX correlator

括基线对相关、每一天线信号和其他天线信号相关在内的算法.

波束合成器/相关器模块的功能是, 组合同一频带内多个天线信号形成单一的相控阵信号, 也可以完成信号对或者一个信号与其他信号和之间的互相关运算. 波束合成器/相关器模块提供两种服务, 一是为射电天文或天线校正提供服务; 二是当保持天线阵同相时, 采用 SUMPLE 算法计算每一个天线信号与其他天线信号和之间的相关函数.

综合滤波器组完成分析滤波器组的逆功能, 即综合同一频带内的信号成为一个时域的信号. 具体来说, 假设深空天线阵列网络由 400 个天线组成, 每一个波束的信号带宽为 100 MHz. 一个可能的解决办法是, 配备 20 个数据路由器, 其中每一个数据路由器接收处理 20 个天线的 100 MHz 信号. 每一个数据路由器产生 20 个输出, 每一个输出在 5 MHz 的带宽内包含了 20 个天线的信号. 波束合成器/相关器模块则处理 20 个数据路由器的输出信号. 最后形成多路时域信号供遥测接收机处理. 当然, 这个模块不仅要完成波束合成, 还要产生修正数据. 修正数据返回到分析滤波器组, 完成时延和相位调整等.

4 频域波束合成器中的信号处理

频域波束合成器主要包括分析–综合滤波、阵列信号相干合成和自适应可变分数时延等关键技术.

4.1 分析–综合滤波

基于临界采样 (Nyquist 采样) 的多相滤波器组 + FFT 的分析–综合滤波器组对如图 3 所示. 在分析滤波器组中, 采样长度为 kM 的数据段被分解成 k 段长度为 M 的数据段, 并按数据段相加. M 点数据通过傅立叶变换, 变换结果就是分析滤波器组输出. 逆过程则用于重建数据信号.

在分析–综合滤波器组对中, 如果采取临界采样, 则相邻频带边缘会出现混叠现象. 如果采取过采样, 滤波器响应没有变化, 但可抑制混频现象. 但对过高的采样率, 信号重构时纹波会增大. 因此, 如何选择多相滤波器组长度和过采样比例因子, 需要折衷考虑相邻频带之间的混叠和重构信号纹波的影响.

4.2 阵列信号相干合成

与时域波束合成器相比, 频域波束合成器中的阵列信号相干合成比较简单. 多个子阵列合成原理如图 4 所示. 即把天线分成若干个子阵列, 子阵列信号相加. 双寄存器分别交替完成信号相加和清零, 即一个寄存器对某个子阵列信号相加, 另一个寄存器清零等待相加下一个子阵列信号. 这样两个寄存器相互交替相加, 按子阵列的顺序串行输出合成信号送至图 2 中的综合滤波器组. 图 4 中的深空阵列网络设由 400 个天线组成, 每 20 个天线组成一个子阵列.

由上可见, 这种子阵列的信号合成具有很强的灵活性. 根据探测任务的不同, 可以选择不同的子阵列组合, 并可支持多任务的接收处理. 同时, 这种方式使得子阵列之间可以互为备份, 整个深空阵列网络鲁棒性得到提高. 此外, 由于深空探测信号十分微弱, 阵列信号的相干合成还需要考虑临近频道干扰或者自然界电磁干扰的影响.

4.3 自适应可变分数时延

天线信号的相干性是提高深空阵列网络信号接

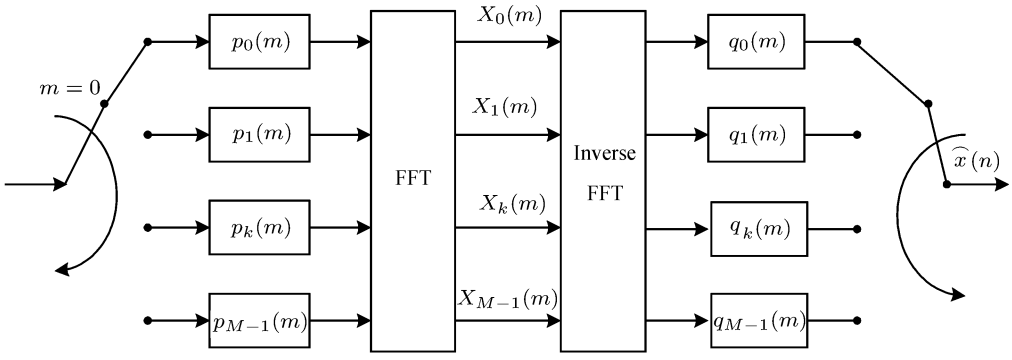

图 3 临界采样的分析–综合滤波器组对

Fig. 3 Critically sampled analysis-synthesis filter pairs

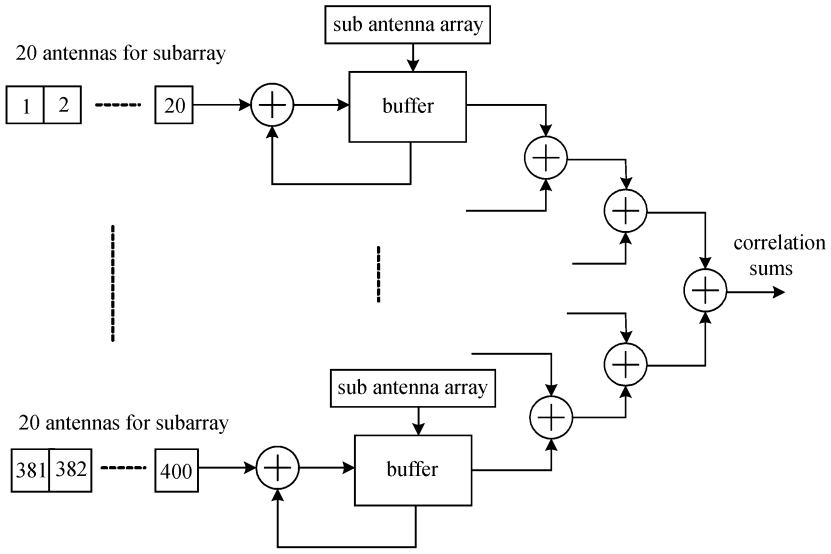

图 4 子阵列合成原理

Fig. 4 Block diagram for beamforming multiple subarrays

收能力的关键. 只有确保信号相干, 信号相干合成才能提高信号功率, 抑制噪声. 而为了得到这种希望的结果, 应尽可能精准地使所有信号在时间上对齐, 这意味着只有采用尽可能小的分数时延方式才能实现. 同时, 由于深空阵列信号时延和多普勒频移的时变性, 还要求采用自适应可变分数时延. 自适应可变分数时延器可采用可变不对称系数、线性相位的 FIR 全通滤波器架构.

5 结论

为满足深空探测数据传输率不断提高的需要, 从提高地面接收能力角度, 提出了一种基于 FX 相关器的频域波束合成架构, 分析了波束合成器架构中涉及到的分析–综合滤波、阵列信号相干合成和自适应可变分数时延等信号处理关键技术, 得到如下结论.

①与 NASA 提出的时域波束合成器相比, 基于 FX 相关器的频域波束合成可以省去复杂的返回路径和连接, 具有很强的鲁棒性.

②根据探测任务的不同, 可以灵活选择不同的子阵列组合, 便于多任务的接收处理.

参考文献

[1] Edwards C D, Depaula R. Key telecommunications technologies for increasing data return for future Mars Exploration [J]. *Acta Astron.*, 2007, **61**(1):131-138

[2] Paula R P. Evolution of the communication systems and technology for Mars exploration [J]. *Acta Astron.*, 2002, **51**(1):207-212

[3] Hu Shengbo, Meng Xin, Yao Xiujuan. Key technologies of autonomous radio for deep space network [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(6):512-518. In Chinese (胡圣波, 孟新, 姚秀娟, 等. 深空探测中的自主无线电关键技术 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(6):512-518)

[4] Mukai R, Vilnrotter V, Arbshahi P. Tracking performance of adaptive array feed algorithms for 70-meter DSN antennas [R]. TMO Progress, 2000. 42-143

[5] Gatti M S. The Deep space network large array [R]. IPN Progress Report, 2004, 42-157

[6] Jeffs B D, Warnick K F. Signal processing for phased array feeds in radio astronomical telescopes [J]. *IEEE J. Sel. Top. Sig. Proc.*, 2008, **2**(5):635-646

[7] Staman J I, Gatti M S. Deep space network array-update [C]//Space Ops., 2006. 19-23

[8] Robbins N R, Menninger W L. Ka-band space traveling wave tube amplifiers [C]//Proceedings of IEEE International Vacuum Electron Sources, 2006. 25-27

[9] Rogstad D H. The SUMPLE algorithm for aligning arrays of receiving radio antennas: coherence achieved with less hardware and lower combining loss [R]. IPN Progress Report, 2005. 42-162

[10] Bunton J D. New generation correlators [C]//Proceedings of URSI General Assembly, 2006

[11] Urry W L. The ATA Imager [R]. ATA memo 39, 2002

[12] Warr G B, *et al.* Prototyping SKA Technologies at the Molonglo Radio Telescope [R]. Leura, Australia:WARS02, 2002, J8